

doi: 10.11720/wtyht.2021.1087

李展辉,杨森鑫,曹学峰.瞬变电磁法感应电压场与 B 场探测效果的数值计算对比分析[J].物探与化探,2021,45(1):114-126. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1087>

Li Z H, Yang M X, Cao X F. A numerical study of transient electromagnetic sounding effect using the induced voltage and the B field data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 114-126. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1087>

瞬变电磁法感应电压场与 B 场探测效果的数值计算对比分析

李展辉¹, 杨森鑫², 曹学峰¹

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 河北地质大学 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031)

摘要: 本文通过一维和三维正演程序分别生成了回线源瞬变电磁法的感应电压场和 B_z 场数据, 并从多个角度对比了二者的探测效果。通过多个模型对比分析了这两种数据在当前主流硬件的数据采集精度下的最长有效延迟时间; 通过全时视电阻率计算与一维反演对比分析了两种数据的纵向分辨率和横向分辨率。结果表明, 在本文采用的仪器精度水平和测量方式下, 只有当模型中存在电导率 $\geq 0.036 \text{ S/m}$ 的高导异常体时, B_z 场的有效观测延迟时间才可能比感应电压场更长; B_z 场相比感应电压场虽然能够提前感知到地下异常体, 但是在横向和纵向分辨率以及对异常体电导率的呈现程度上均比感应电压场差。在实际野外测量时, 不建议仅开展 B_z 场测量, 而是在有条件下, 同时采集感应电压场和 B_z 场, 充分利用感应电压场和 B_z 场各自的优势, 达到最佳的探测效果。

关键词: 瞬变电磁; B 场; 感应电压; 视电阻率; 一维反演; 分辨率

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)01-0114-13

0 引言

瞬变电磁法对于地下矿产与水资源勘查以及基础地质调查具有重要意义。常规的回线源瞬变电磁法采用感应线圈接收发射电路关断后地下介质产生的二次感应电压, 即接收线圈中磁通量随时间的变化率。感应电压场在晚期随时间以 $t^{-5/2}$ 的方式迅速衰减^[1], 探测深度普遍限制在 1 km 以内。随着地表资源的减少, 我国对深部矿产资源勘查的需求日益迫切, 开始大力开展深部矿产资源勘查工作。针对这一需求, 近年来, 瞬变电磁的磁感应强度 B 场观测越来越受到人们的关注。在理论上, B 场在晚期随时间以 $t^{-3/2}$ 的方式衰减^[1], 相比感应电压场似乎能在更长的时间内获取有效数据, 有利于深部资源的探测。此外, 研究表明, 在某些条件下(如电性

源瞬变电磁), 磁感应强度垂直分量 B_z 场的视电阻率是单一的^[2], 而感应电压场视电阻率具有多解性, 使用 B_z 场更方便于视电阻率的计算。基于以上 B 场探测的优势, 一些研究人员研制了磁通门与基于超导量子干涉器(superconducting quantum interference device, SQUID)的磁强计, 并开展了实际测试与应用。澳大利亚的 EMIT 公司开发了三轴 B 场传感器 SMART Fluxgate, 已经上市售卖并在实际应用中应用; 王兴春等利用该磁通门探头在某铜镍矿区域开展了探测效果分析^[3]; 吉林大学等单位联合开发了基于低温 SQUID 的瞬变电磁 B 场传感器并开展了试验应用, 取得了较好的效果^[4-5]; 陈晓东等开发了高温 SQUID 磁强计并在野外试验应用, 采集到了精度显著高于传统传感器的 B 场数据^[6]; Geotech、SkyTEM 等航空电磁研制与应用公司已经分别在各自的部分航空瞬变电磁探测系

收稿日期: 2020-02-26; 修回日期: 2020-06-04

基金项目: 国家重点研发计划重大科学仪器设备开发专项课题(2018YFF01013305)

作者简介: 李展辉(1986-), 男, 博士, 2014年毕业于北京大学地球与空间科学学院, 主要从事电磁探测方法的理论研究与应用工作。Email: zhanzhan@163.com

万方数据

统中集成了 B 场采集系统,能够实时收录 B 场^[7]; Smith 与 Annan 从数据本身角度分析了 B 场相对感应电压场的优势^[8],并研究了从传统感应线圈中获取 B 场数据的方法^[9]; Wolfgram 与 Thomson 在高导地区使用了航空电磁 B 场进行了分析应用^[10]; 崔江伟等研究了接地导线源瞬变电磁感应电压场—— B 场转换方法,并开展了对针对 B_z 场的视电阻率计算方法研究,取得了良好的效果^[2]。

然而, B 场的探测效果研究大多仅限于此,探测结果的横向分辨率、纵向分辨率、电阻率反演的准确性等重要参数少有分析。基于以上现状,且在目前 B 场研究与应用主要集中在 B_z 场的基础上,本文对 B_z 场与垂直归一化感应电压场 $-dB_z/dt$ 的探测效果进行更深入分析。采用回线源瞬变电磁法一维或三维正演算法计算出一维模型或者三维模型的感应电压场与 B_z 场数据,然后针对合成数据开展数据对比、视电阻率对比、反演结果对比等探测效果分析,

对比感应电压场和 B_z 场的纵向分辨率、横向分辨率、电阻率反演结果的准确性,为实际瞬变电磁探测应用提供指导。

1 正反演方法

本文采用一维或三维正演算法生成合成的感应电压场和 B_z 场数据,采用全时视电阻率计算方法^[2,11]计算各自的视电阻率,采用一维反演方法^[12]进行反演对比分析。

1.1 一维正演方法

针对如图 1a 所示的层状模型以及铺设于地表之上的水平回线源和接收点,可以首先采用水平电偶极子积分的方式计算出频率域的磁场响应,然后采用正弦变换或者余弦变换将频率域磁场响应变换成时间域的感应电压场或者 B 场。

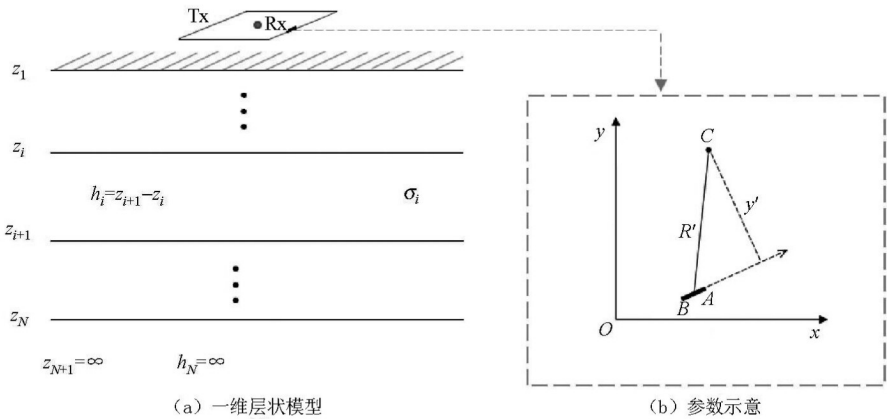


图 1 一维层状模型示意 (a) 及组成回线源的水平电偶极子 AB 与接收点 C 之间的参数 R' 与参数 y' 示意 (b)
Fig.1 A schematic figure of the one-dimensional layered model (a) and the delineation of the parameter R' and y' between the horizontal electric dipole AB that constitute the loop source and the receiving point C (b)

图 1b 中 AB 为位于地面上方 h 处的水平电偶极子,电流方向为 $B \rightarrow A$; C 为位于地面上方 z_r 处的接收点; R' 代表接收点 C 到偶极子 AB 之间的水平距离; y' 代表接收点 C 到直线 AB 之间的距离,其正负符号由右手原则确定。对于水平发射线圈,在接收点 C 处的频率域垂直磁场响应可表示为^[12]

$$H_z = \frac{I}{4\pi} \frac{y'}{R'} \int_0^\infty (e^{-\lambda(z_r+h)} + r_{TE} e^{\lambda(z_r-h)}) \lambda J_1(\lambda R') d\lambda ds, \tag{1}$$

式中: I 为偶极子电流; h 为发射线圈的离地高度; z_r 为接收点的离地高度; ds 为偶极子长度; λ 为汉克尔积分变量; r_{TE} 为地表 TE 模式反射率,由地下地层的电性参数与厚度参数组合迭代而成^[12]。

求出频率域磁场后,阶跃关断源在接收点的归一化感应电压值 $V_z(t)$ 或时域磁感应场值 $b_z(t)$ 可以通过正弦变换或余弦变换来实现:

$$V_z = - \frac{\partial b_z(t)}{\partial t} = - \frac{2I\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \text{Im}[H_z(\omega)] \sin(\omega t) d\omega, \tag{2}$$

$$b_z(t) = - \frac{2I\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{\text{Im}[H_z(\omega)]}{\omega} \cos(\omega t) d\omega. \tag{3}$$

受到电子元器件性能限制等因素的影响,实际发射波形不可能是理想阶跃波形,有一定的开启与关断时间。为准确描述接收的感应电压场和 B_z 场,需要计算全波形的场值。全波形场值可在阶跃场值的基础上通过卷积的方式得到:

$$V_{z,w}(t) = -V_{z,\text{step}}(t) * I'_w(t), \quad (4)$$

$$b_{z,w}(t) = -b_{z,\text{step}}(t) * I'_w(t). \quad (5)$$

式中: $V_{z,\text{step}}(t)$ 和 $b_{z,\text{step}}(t)$ 分别为感应电压场和 B_z 场的阶跃关断响应; $V_{z,w}(t)$ 和 $b_{z,w}(t)$ 为对应的全波形响应; $I'_w(t)$ 为发射电流波形的时间导数。

1.2 三维正演方法

三维正演采用基于 Du Fort-Frankel 格式的时域有限差分方法^[13-15]。对于瞬变电磁法, 可以针对如下 Maxwell 旋度方程组进行二阶差分离散:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为电场; $\mathbf{H}$ 为磁场; μ 为磁导率; σ 为电导率; γ 为确保数值计算稳定的人为设置介电常数, 随时间步长的变化而变化。

为能够计算 $\mathbf{B}$ 场, 需要将回线源通电时的静磁场作为初始磁场加载到正演程序中。为确保磁场散度为零的特征, 本文通过磁矢势来计算初始磁场^[16], 然后加载到正演程序中, 同时计算出三维模型的 $\mathbf{B}$ 场和感应电压场。三维正演直接计算出来的是阶跃关断电流所产生的感应电压场和 $\mathbf{B}$ 场, 在此基础上, 结合发射电流的实际波形, 利用式(4)和式(5)可分别求出全波形的感应电压场和 $\mathbf{B}$ 场。

1.3 全时视电导率计算与反演方法

本文主要对比感应电压与 B_z 场的视电导率与反演成像结果。视电导率的计算以正演程序为基础, 利用二分法进行全时视电导率计算^[2,11]。本文在视电导率计算过程中, 为准确获取感应电压与 B_z 场对应的视电导率值, 二分法搜索的停止阈值设置为

$$\left| \frac{d_{\text{app}} - d_{\text{obs}}}{d_{\text{obs}}} \right| < 0.01\%, \quad (7)$$

式中: d_{app} 为利用视电导率正演所得数据; d_{obs} 为模型的观测数据。反演则采用 Tikhonov 正则化约束进行反演。反演目标函数可表示为

$$\phi = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{d} - \mathbf{G}(\mathbf{m}))\|_2^2 + \alpha \|\mathbf{L}(\mathbf{m} - \mathbf{m}^{\text{ref}})\|_2^2, \quad (8)$$

式中: $\mathbf{d}$ 为测量的数据; $\mathbf{G}(\mathbf{m})$ 为正演所得数据; $\mathbf{W}_d$ 为数据权重矩阵; $\mathbf{m}$ 为模型参数; $\mathbf{m}^{\text{ref}}$ 为参考模型参数; $\mathbf{L}$ 为模型约束矩阵; α 为正则化参数。

对上述目标函数进行最小化迭代, 可得到关于第 $k+1$ 步模型参数增量 $\Delta \mathbf{m}$ 的最小二乘方程组:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_d \mathbf{J}(\mathbf{m}^k) \\ \sqrt{\alpha} \mathbf{L} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{m} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_d(\mathbf{d} - \mathbf{G}(\mathbf{m}^k)) \\ -\sqrt{\alpha} \mathbf{L}(\mathbf{m}^k - \mathbf{m}^{\text{ref}}) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: $\mathbf{J}(\mathbf{m}^k) = \partial \mathbf{G}(\mathbf{m}^k) / \partial \mathbf{m}^k$ 为第 k 步正演数据对模型参数的敏感度矩阵。通过求解这一最小二乘方程组, 第 $k+1$ 步模型参数可表示为 $\mathbf{m}^{k+1} = \mathbf{m}^k + \Delta \mathbf{m}$ 。直到反演残差达到预定的值, 或者不再下降, 或者反演次数达到预定的值, 反演迭代停止。

针对本文中的反演问题, 由于电导率的变化范围跨越数个量级, 感应电压和 B_z 场的变化范围也是数个量级, 为确保反演问题的稳定性, 一般对 $\mathbf{d}$ 的对数值或者相对值进行拟合, 对电导率的对数值进行反演。本文在数据拟合方面对 $\mathbf{d}$ 的相对值进行拟合, 在反演参数方面对电导率的对数值进行反演, 然后转换为电导率。在该条件下, 数据权重矩阵 $\mathbf{W}_d$ 定义为

$$\mathbf{W}_d = \text{diag} \left\{ \frac{1}{d_1 s_1}, \frac{1}{d_2 s_2}, \dots, \frac{1}{d_{N_d} s_{N_d}} \right\}, \quad (10)$$

式中: s_i 为第 i 个数据 d_i 的相对误差; N_d 为数据的数量。如果某次测量的绝对误差水平为 Aerr_i , 最小相对误差水平为 Rerr_i , 那么 s_i 可如下确定

$$s_i = \max \left(\left| \frac{\text{Aerr}_i}{d_i} \right|, \text{Rerr}_i \right). \quad (11)$$

反演均方根 (root-mean-square, rms) 残差可定义为

$$\text{rms} = \sqrt{\|\mathbf{W}_d(\mathbf{d} - \mathbf{G}(\mathbf{m}))\|_2^2 / N_d}. \quad (12)$$

反演终止条件为 $\text{rms} \leq 1$, 或者反演次数达到设定的最大值。由于本文针对拟合数据进行反演, $\text{rms} \leq 1$ 这一条件总是能够达成, 因此不再设置反演次数上限。

本文在一般地层假设条件下进行反演, 即无特定的参考模型, 不假定地下电性异常层的数量、厚度等。因此参考模型 $\mathbf{m}^{\text{ref}}$ 设置为空, 反演初始模型为电导率为 0.001 S/m 的均匀半空间模型, 模型约束矩阵 $\mathbf{L}$ 为纵向一阶导数约束, 正则化参数 α 根据反演情况自适应变化。

2 数据对比分析

2.1 观测延迟时间对比分析

在均匀半空间条件下, 阶跃关断电流源的 B_z 场在晚期以 $t^{-3/2}$ 方式衰减, 而感应电压场在晚期以 $t^{-5/2}$ 方式衰减, 因此 B_z 场在晚期似乎有更大的优势, 能够获取更晚期信息。然而考虑到实际观测设备的噪声水平, B_z 场相比感应电压在何种情况下能够观测到更长时间需要仔细分析。目前基于 SQUID 的磁强计尚处于试验阶段, 未进行大规模商业化应用, 市场上观测 B 场的主要设备为澳大利亚 EMIT

公司的 Fluxgate 三轴磁通门探头,探头精度为 3 pT。加拿大 Geonics 公司的 PROTEM 系统技术指标达到了国际领先,感应线圈探头精度约为 0.1 nT/s。因此本文以这两个精度阈值为标准,考察在不同电导率条件下 B_z 场和感应电压场分别达到这两个阈值时的延迟时间,即精度阈值时间。

设有一尺寸为 200 m×200 m 的单匝发射线圈放置于一个均匀半空间模型的地表,在发射线圈的中心点接收,如图 2 所示。均匀半空间模型的电导率值在 0.000 2~0.5 S/m 之间连续变化,所采用的发射电流的波形如图 3 所示,为一斜阶跃关断波形,电流峰值为 10 A,关断延迟时间为 0.1 ms。时间零点设置为电流关断至零的时刻,数据采集延迟时间从此刻开始计时。针对每个电导率值计算出感应电压场和 B_z 场,并计算每个电导率对应的场值达到各自探头精度阈值水平时的延迟时间,最后得出感应电压场和 B_z 场精度阈值时间随电导率值变化规律(图 4)。

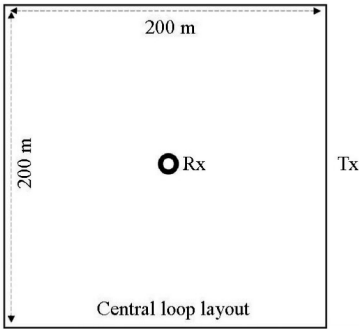


图 2 发射线框尺寸以及接收点的相对位置

Fig. 2 The size of the transmitting loop and the relative position of the receiving point

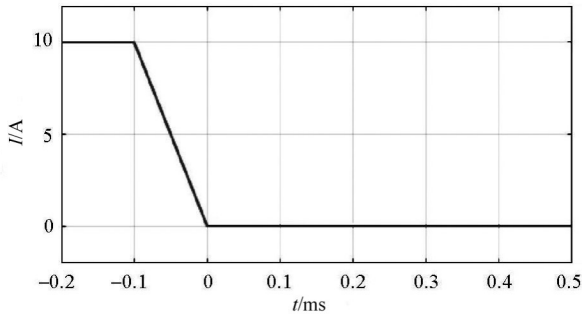


图 3 图 2 所示发射线框中的发射电流波形

Fig. 3 The waveform of the current in the transmitting loop described in Fig. 2

由图 4 可见, B_z 场的精度阈值时间与感应电压场的精度阈值时间呈正比相关,在选取的电导率范围之内都随着电导率的增大而增大。经过进一步分析,在电导率大于 0.036 S/m 时, B_z 场的精度阈值

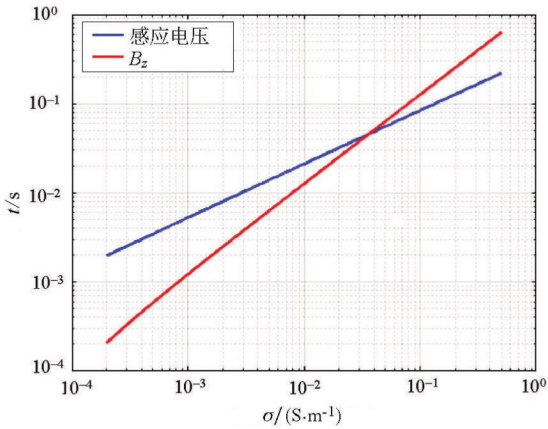


图 4 感应电压场和 B_z 场精度阈值时间随半空间模型电导率的变化

Fig. 4 The precision threshold delay time of induced voltage and B_z varying over the conductivity of the homogenous half space model

时间小于感应电压场的精度阈值时间,而在电导率值大于 0.036 S/m 时, B_z 场的精度阈值时间大于感应电压场的精度阈值时间。

图 5 给出了电导率为 0.036 S/m 时回线中心点的感应电压和 B_z 衰减曲线,当感应电压衰减到 0.1 nT/s 时, B_z 场正好衰减到 3 pT。可见对于本文采用的当前主流的探头精度,以及本文所设定的常用的 TEM 测量方式,只有地下存在电导率高于 0.036 S/m(或者电阻率小于 27.8 $\Omega \cdot m$)的地质体时, B_z 场的精度阈值时间才有可能长于感应电压场的精度阈值时间,这一电导率阈值已经达到了块状硫化物矿、含水泥质黏土、微咸水层等地质体电导率范围。因此, B_z 场在探测良导电异常体方面具有一定的优

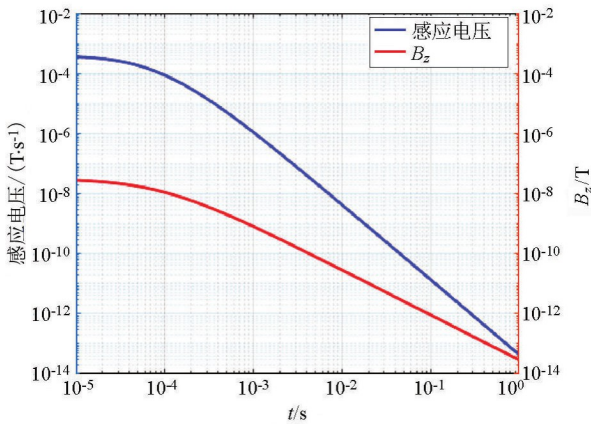


图 5 半空间模型电导率为 0.036 S/m 时感应电压和 B_z 场随延迟时间的衰减曲线

Fig. 5 The attenuation curve of the induced voltage and B_z field of the homogenous model with a conductivity of 0.036 S/m

势,能在更长的延迟时间内观测;但是在探测低导电异常体方面,比如采空区的探测,效果可能不如感应电压场。

2.2 纵向分辨能力对比分析

纵向分辨率对于地质体分层、深度的确认至关重要。本文从视电阻率和一维反演角度详细分析感应电压场和 B_z 场对地层的纵向分辨能力。

首先针对高导异常层模型进行纵向分辨能力测试。模型如图 6 所示。第一层厚度 30 m,电导率为 0.01 S/m;第二层为一个厚度 30 m、电导率 0.05 S/m 的高导异常层;第三层厚度在不同模型中厚度可变,从 10 m 厚度,以 2 m 为间隔逐渐变化到 208 m,变化趋势如图 6b 所示,电导率为 0.01 S/m;第四层为一个厚度为 100 m 的高导异常层,电导率为 0.05 S/m;第五层为一个电导率为 0.01 S/m 的半空间。本测试通过第三层的厚度变化来分析瞬变电磁法感应电压场和 B_z 场对第二层和第四层的纵向分辨能力。对每个模型采用图 2 所示的中心回线装置进行测试

量,并将所得数据拼接成拟二维数据剖面,感应电压场和 B_z 场的的数据分别如图 7a 和图 7b 所示。从数据上难以直观地看出纵向分辨率信息。因此本文对正演所获取的数据开展了全时视电导率成像与一维反演成像分析。

以一维正演程序为基础,开展二分法全时视电导率计算分析。感应电压和 B_z 场全时视电导率结果分别如图 8a 和图 8b 所示。视电导率计算过程中没有考虑数据的误差情况,以式 (7) 作为视电阻率计算终止条件,获取高精度的视电阻率值。

为定量分析第二和第四 2 个高导异常层刚好被分辨时第三层的厚度,本文定义视电导率曲线从单峰值曲线变为双峰值曲线时对应的模型第三层厚度为视电导率分辨临界厚度。在此临界厚度定义下进行分析,得出感应电压场视电导率在第 25 个模型,即第三层厚度为 58 m 时,出现了双峰现象,此时 B_z 场视电导率曲线依然是单峰曲线,如图 9a 所示;而 B_z 场直到第 35 个模型,即第三层厚度为 78 m 时,才

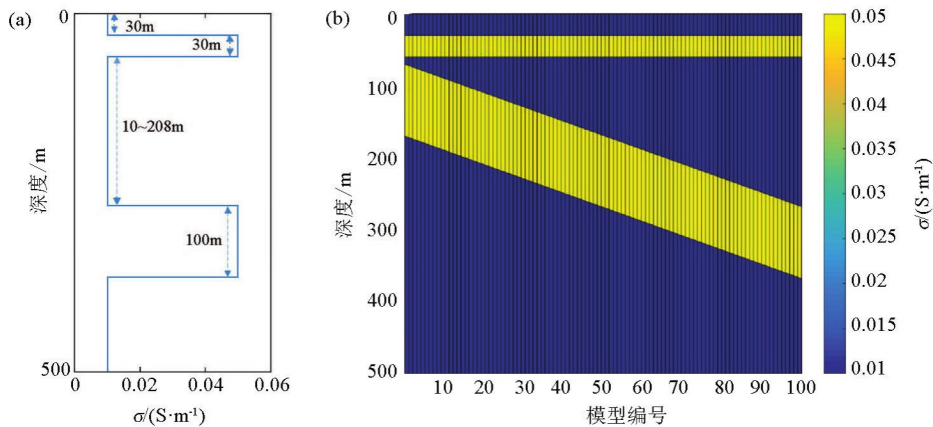


图 6 用于纵向分辨能力测试的高导异常模型示意 (a) 以及由此生成的 100 个参与实际计算的模型 (b)
Fig. 6 The model framework containing high conductive layers for longitudinal resolution test (a) and the 100 actual models used in calculation (b)

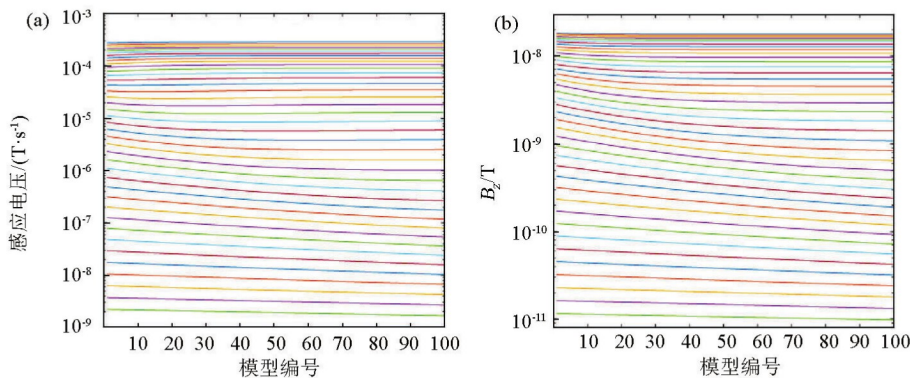


图 7 针对图 6 所示模型计算出的感应电压场 (a) 和 B_z 场 (b) 数据剖面

Fig. 7 The induced voltage (a) and B_z data (b) calculated from the models described in Fig. 6
万方数据

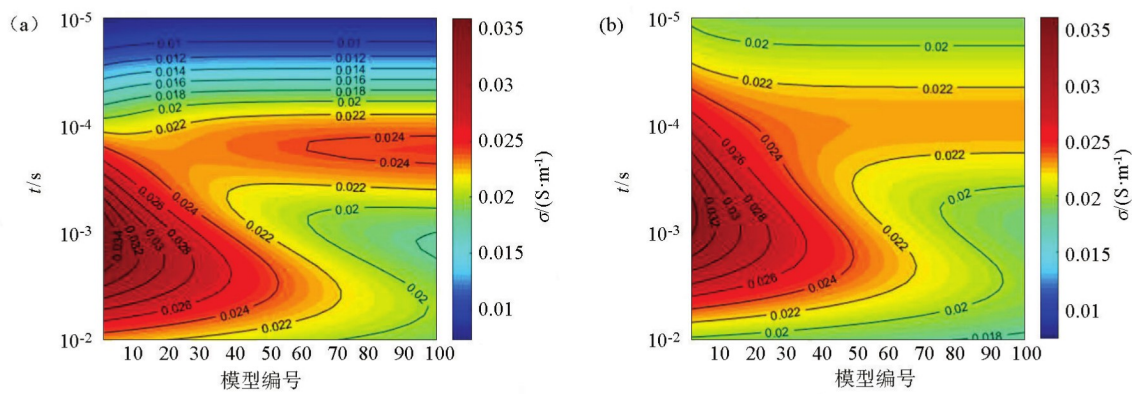


图 8 针对图 7 中感应电压场(a)和 B_z 场(b)计算得到的全时视电导率拟二维图

Fig. 8 The all-time apparent conductivities calculated from the induced voltage data (a) and B_z data (b) shown in Fig. 7

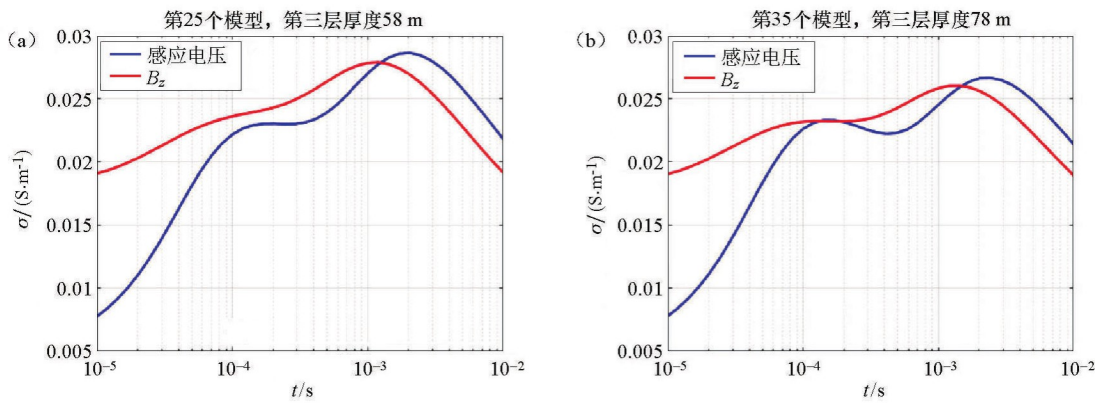


图 9 图 6 中模型第三层厚度分别达到 58 m(感应电压视电阻率临界厚度)(a)和 78 m(B_z 视电阻率临界厚度)(b)时对应的感应电压视电导率和 B_z 场视电导率曲线

Fig. 9 The induced voltage all-time apparent conductivity curve and B_z all-time apparent conductivity curve of the model in Fig. 6 when the third layer comes to 58 m (critical resolution thickness of induced voltage apparent conductivity) (a) and 78 m (critical resolution thickness of B_z apparent conductivity) (b), respectively

出现双峰现象,此时感应电压场的视电导率具有更明显的双峰现象,如图 9b 所示。可见,针对高导异常层,感应电压场基于视电导率的分辨临界厚度要小于 B_z 的分辨临界厚度,具有更好的纵向分辨能力。同时也可以看出, B_z 场视电导率的峰值时间一直早于感应电压场视电导率的峰值时间, B_z 场在更早的时间感知到了高导异常层。可以初步判断, B_z 场能够更早地感知到地下高导异常体信息,但是在纵向分辨率上不如感应电压场。

实际应用中,更重要的是以反演结果进行探测效果分析,因此进一步对数据开展了一维反演分析。在反演过程中,考虑到实际测量数据的误差以及仪器探头自身的精度水平,对数据设定了一定的数据误差。参考 PROTEM 系统,感应电压场的绝对误差水平 A_{err} 为 0.1 nT/s,同时设定最小相对误差水平 R_{err} 为 3%;参考 EMIT 的磁通门探头, B_z 场的绝对误差水平为 5 pT,同时设定最小相对误差水平为 3%。

在此误差水平下,反演过程中的数据权重矩阵可以用式(10)和式(11)共同计算出来。分别对感应电压场与 B_z 场进行反演,结果分别如图 10a 和图 10b 所示。与视电导率分析类似,定义反演电导率曲线从单峰值曲线变为双峰值曲线时对应的模型第三层厚度为反演分辨临界厚度。基于此临界厚度分析,得出感应电压场反演电导率在第 6 个模型,即第三层厚度为 20 m 时,出现了双峰现象,此时 B_z 场反演电导率曲线依然是单峰曲线,如图 11a 所示;而 B_z 场直到第 36 个模型,即第三层厚度为 80 m 时,才出现双峰现象,此时感应电压场的反演电导率具有非常明显的双峰现象,如图 11b 所示。从反演结果中,可以看到感应电压场在纵向分辨能力上具有更大的优势。

为进一步分析感应电压场和 B_z 场对低导异常层的纵向分辨能力,将图 6 所示模型中的第二、第四层改为电导率为 0.002 S/m 的低导异常层,其余模

型参数均不变,模型如图 12 所示。首先正演出一维数据,然后开展视电导率和反演成像分析。感应电压和 B_z 场数据分别如图 13a 和图 13b 所示,视电导率成像分别如图 14a 和图 14b 所示。同样开展视电

导率分辨临界厚度分析,由于回线源瞬变电磁法对低导异常层的敏感度天然较低,感应电压场直到第 32 个模型,即第三层厚度为 72 m 时,视电导率曲线才出现极小双谷现象,如图 15a 所示;而 B_z 场则是

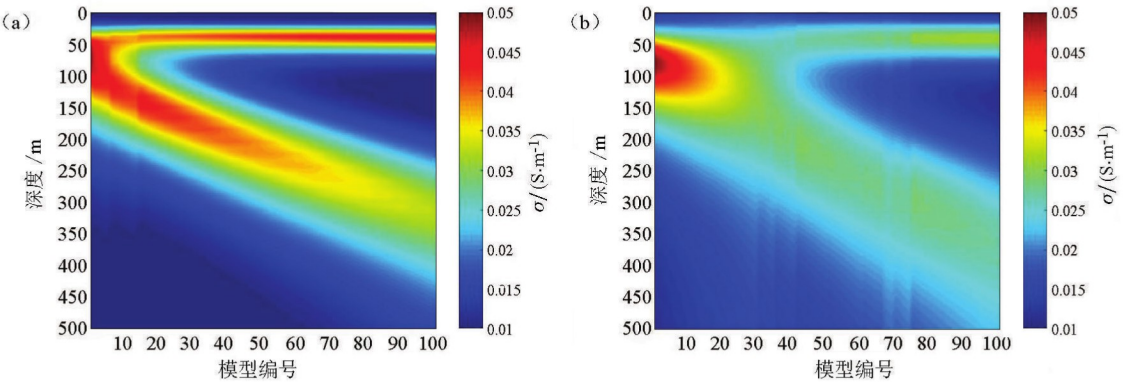


图 10 针对图 7 中感应电压场 (a) 和 B_z 场 (b) 反演得到的电导率拟二维剖面

Fig. 10 The conductivities inverted from the induced voltage data (a) and B_z data (b) shown in Fig. 7

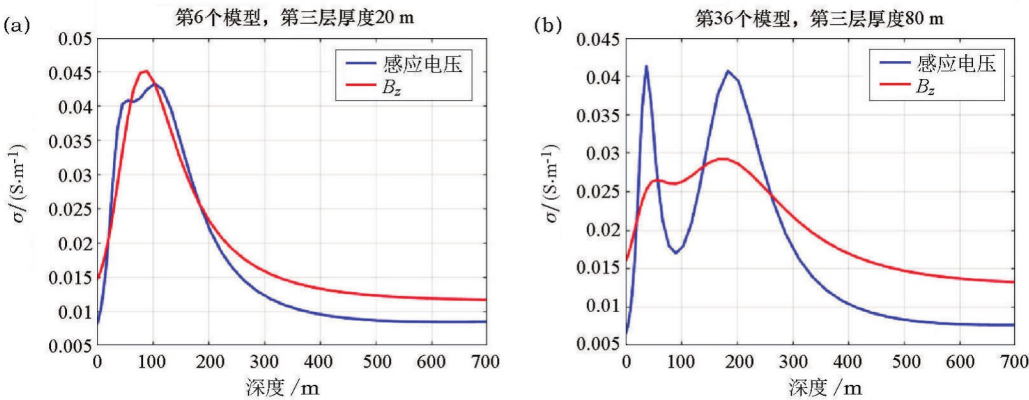


图 11 图 6 中模型第三层厚度分别达到 20 m (感应电压反演临界厚度) (a) 和 80 m (B_z 反演临界厚度) (b) 时对应的感应电压反演电导率和 B_z 场反演电导率曲线

Fig. 11 The induced voltage inverted conductivity curve and B_z inverted conductivity curve of the model in Fig. 6 when the third layer comes to 20 m (critical resolution thickness of induced voltage inversion) (a) and 80 m (critical resolution thickness of B_z inversion) (b), respectively

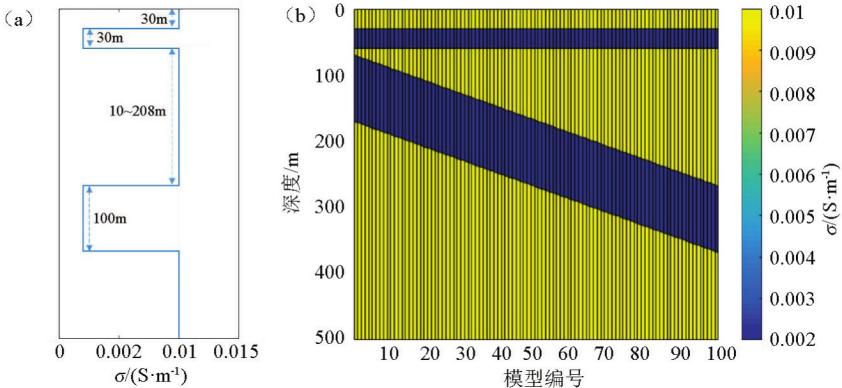


图 12 用于纵向能力测试的低导异常模型示意 (a) 以及由此生成的 100 个参与实际计算的模型 (b)
Fig. 12 The model framework containing low conductive layers for longitudinal resolution test (a) and the 100 actual models used in calculation (b)

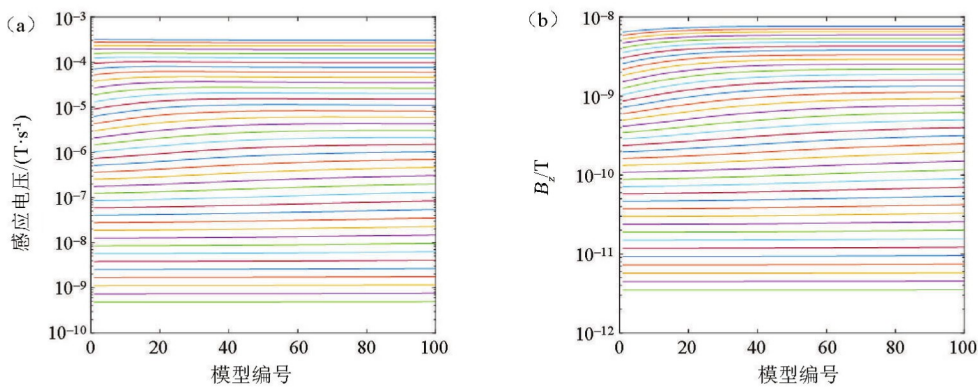


图 13 针对图 12 所示模型计算出的感应电压场 (a) 和 B_z 场 (b) 数据剖面

Fig. 13 The induced voltage (a) and B_z data (b) calculated from the models described in Fig. 12

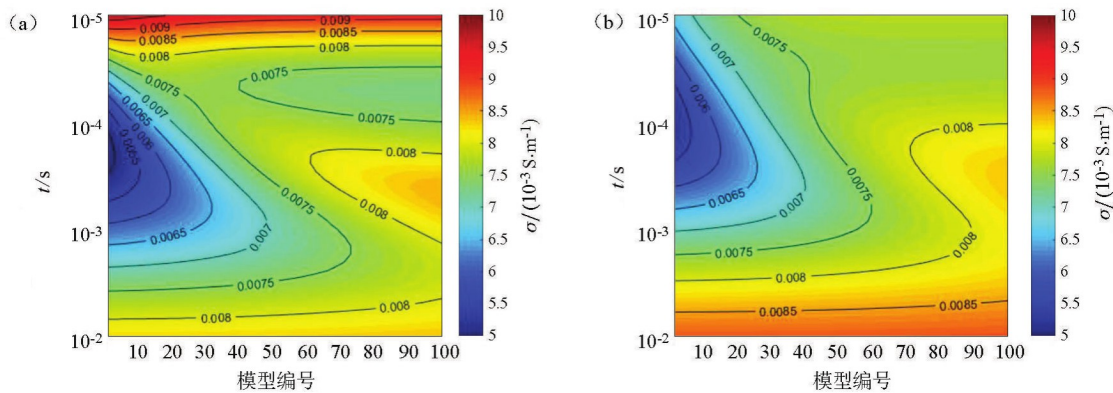


图 14 针对图 13 中感应电压场 (a) 和 B_z 场 (b) 计算得到的全时视电导率拟二维图

Fig. 14 The all-time apparent conductivities calculated from the induced voltage data (a) and B_z data (b) shown in Fig. 13

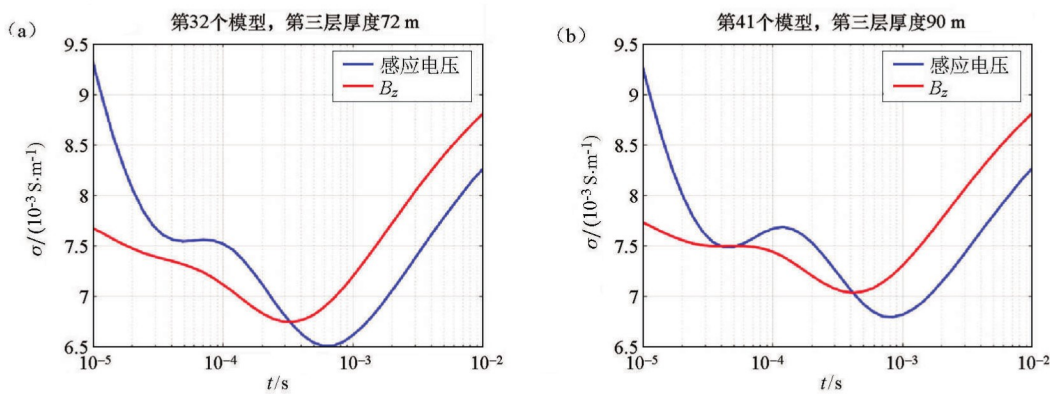


图 15 图 12 中模型第三层厚度分别达到 72 m (感应电压视电阻率临界厚度) (a) 和 90 m (B_z 视电阻率临界厚度) (b) 时对应的感应电压视电导率和 B_z 场视电导率曲线

Fig. 15 The induced voltage all-time apparent conductivity curve and B_z all-time apparent conductivity curve of the model in Fig. 12 when the third layer comes to 72 m (critical resolution thickness of induced voltage apparent conductivity) (a) and 90m (critical resolution thickness of B_z apparent conductivity) (b), respectively

到第 41 个模型,即第三层厚度为 90 m 时,视电导率曲线才出现极小双谷现象,如图 15b 所示。可见,对于低导异常层,感应电压场的视电导率分辨能力同样强于 B_z 场。不过仍然可以看到 B_z 场视电导率出现极小波谷的时间均提前于感应电压场。

在反演分析中加入的噪声与上一个高导异常模

型一致。感应电压和 B_z 场反演结果分别如图 16a 和图 16b 所示。同样开展反演电导率分辨临界厚度分析。由于数据误差的加入,感应电压场的分辨临界模型推后到了第 46 个模型,即第三层厚度到 100 m 时,才能够将两个低导层区分开来,如图 17a 所示;而 B_z 场受到数据噪声的影响,反演电导率直到

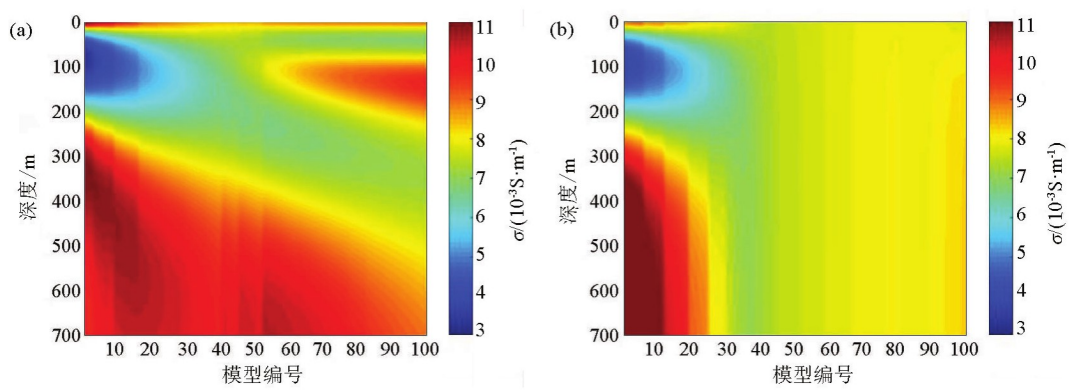


图 16 针对图 13 中感应电压场 (a) 和 B_z 场 (b) 反演得到的电导率拟二维剖面

Fig. 16 The conductivities inverted from the induced voltage data (a) and B_z data (b) shown in Fig. 13

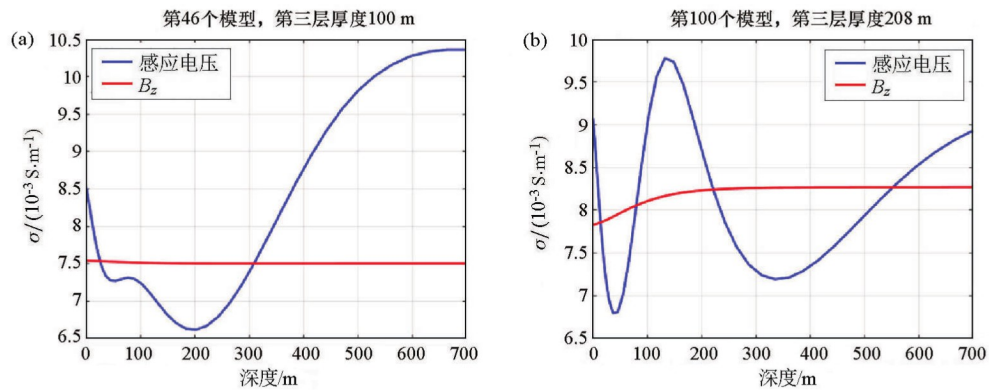


图 17 图 12 中模型第三层厚度分别达到 100 m (感应电压反演临界厚度) (a) 和 208 m (最后一个模型) (b) 时对应的感应电压反演电导率和 B_z 场反演电导率曲线

Fig. 17 The induced voltage inverted conductivity curve and B_z inverted conductivity curve of the model in Fig. 12 when the third layer comes to 100 m (critical resolution thickness of induced voltage inversion) (a) and 208 m (the last model) (b), respectively

第 100 个模型也没有出现双极小波谷现象,全程未能分辨出两个低导异常层,如图 17b 所示。可见,相比感应电压场, B_z 场对低导异常层的分辨率同样更低,并且感应电压场反演得到的电导率异常值更接近于真实的电导率异常。

通过上述高导异常层模型和低导异常层模型的纵向分辨能力分析可知, B_z 场相比感应电压场能够提前感知到地下异常层,但是视电导率和反演电导率纵向分辨率明显不如感应电压场,感应电压场成像对电导率异常的呈现能力也更强。

2.3 横向分辨率对比

横向分辨率对于岩体边界的划分、矿体范围的圈定十分重要。以航空 TEM 测量为例,目前主流的航空 TEM 系统水平采样间隔在 5 m 左右,旨在利用高测点密度识别出目标岩体、矿体边界。为对比感应电压场与 B_z 场的横向分辨率,本文设计了如图 18 所示的模型。电导率为 0.01 S/m 的半空间中包

右依次为 1~6。异常体顶面埋深为 10 m,在 y 方向相当于无限延伸。除最右侧的 6 号异常体外,其余异常体在 x 和 z (深度) 方向的尺寸均为 10 m,由于网格划分的原因,6 号异常体在 x 方向的尺寸略大于 10 m,但不影响分析结果。异常体之间水平间隔从左至右分别为 10 m、20 m、30 m、40 m、55 m。发射线圈直径为 26 m,匝数为 5 匝,发射电流峰值为 175 A,总发射磁矩为 46.5 万 Am^2 ,并假定发射波形为三角波,具体波形如图 19 所示,时间零点为电流关断至零的时刻。接收线圈位于发射吊舱中心,与发射线圈共平面。整个吊舱离地高度为 30 m,以 5 m 采样间隔沿 x 方向从 -150 m 位置飞行到 150 m 位置。电流关断后的数据采集延迟时间范围为 0.01~2.51 ms,时间门个数为 30。

采用三维时域有限差分进行正演计算,得到感应电压场和 B_z 场的阶跃响应数据,然后通过时间域卷积得到全波形的感应电压场和 B_z 场数据(图 20)。数据上体现出的异常均比较弱,需要进一步进

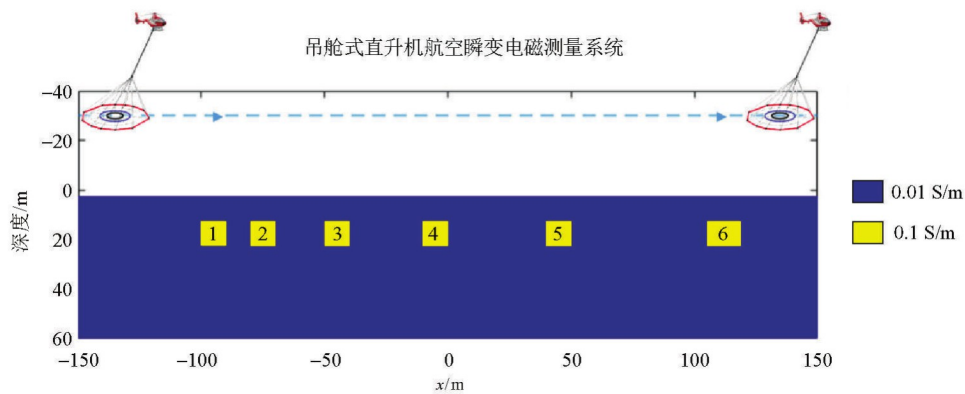


图 18 用于横向分辨能力测试的三维异常体模型

Fig. 18 The three-dimensional model for horizontal resolution test

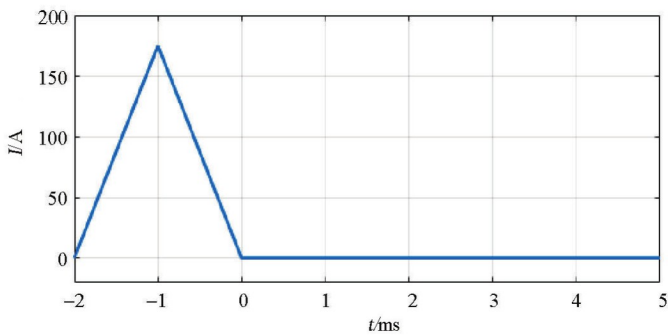


图 19 正演计算中采用的航空瞬变电磁测量系统发射波形(时间零点为电流关断至零的时刻)

Fig. 19 The transmitting waveform of the airborne transient electromagnetic survey system used in 3D forward modelling (the zero time is set at when the current descends to zero)

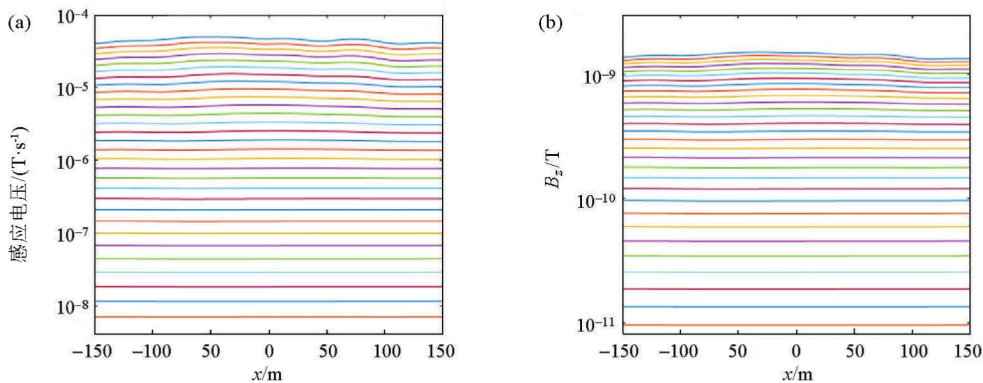


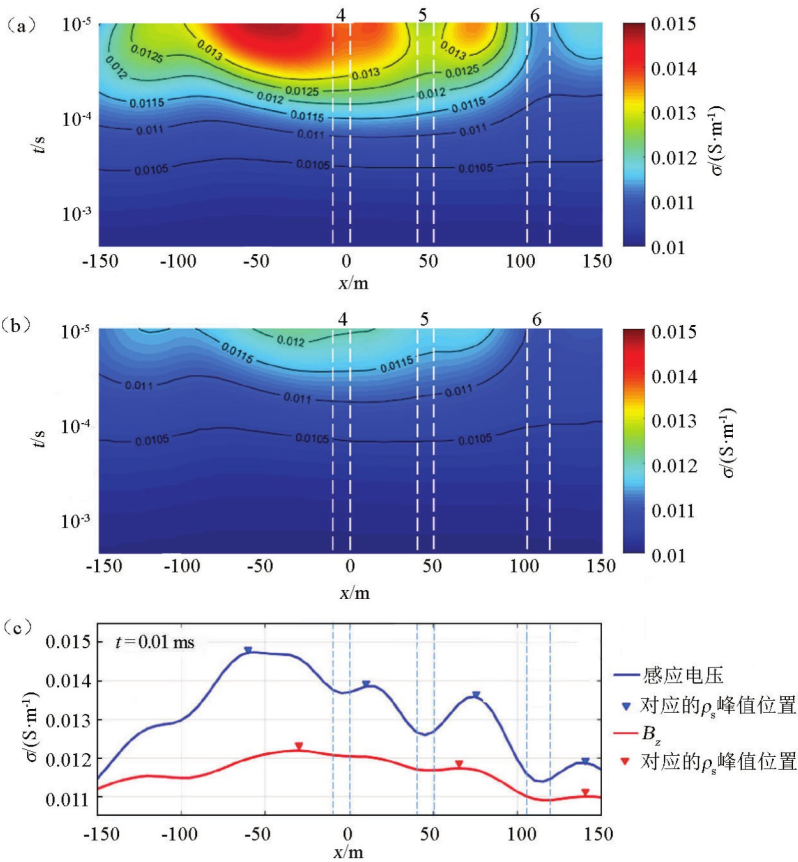
图 20 针对图 18 中的模型采用三维正演计算出的感应电压场 (a) 以及 B_z 场 (b) 剖面

Fig. 20 The induced voltage (a) and B_z data (b) calculated from the model described in Fig. 18 by 3D forward modelling

行电导率成像分析。由于对于此类三维模型数据的一维反演会产生较明显的假象^[17],而现阶段三维反演并不成熟,因此本文在此仅开展全时视电导率计算,针对视电导率进行对比。感应电压数据和 B_z 场数据计算出的全时视电阻率分别如图 21a 和 21b 所示,图中标记出了 4、5、6 号异常体的水平位置。从图中可以看出,4、5、6 号异常体正上方的异常比较弱,而两侧的异常比较强,形成假异常体。这是由于

异常体尺寸相对发射线圈较小、分布较浅导致的。根据瞬变电磁场的烟圈理论,当吊舱飞到异常体正上方时,感应电磁场向四周扩散,正下方的异常体的感应强度反而比较弱,相对的旁侧较近范围的异常电磁感应会比较强烈。针对该现象,必须进行二维或者三维反演才能将异常体反演到正确的位置上,这一点将在后续工作中进行研究。

从视电导率随时间的变化来看,两种数据均在



a—由感应电压数据计算的全时视电导率拟二维剖面;b—由 B_z 数据计算的全时视电导率拟二维剖面;c— $t=0.01$ ms 时刻感应电压与 B_z 场视电导率随水平距离的变化曲线;虚线表示第 4、5、6 号异常体在 x 方向的具体位置;蓝色倒三角形和红色倒三角形分别为对应视电阻率曲线的峰值

a—the all-time apparent conductivities calculated from the induced voltage data;b—the all-time apparent conductivities calculated from the B_z data;c—shows the apparent conductivity curves of the induced voltage and B_z field over x position;the dashed lines delineated the positions of the abnormal bodies 4~6 in x direction;the blue and red inverted triangles labeling the peaks of the corresponding curves

图 21 针对图 20 中感应电压数据和 B_z 数据计算得到的全时视电导率拟二维剖面

Fig. 21 The all-time apparent conductivities calculated from the induced voltage data and B_z data shown in Fig. 20.

第一个采样时间点获取到了较强的异常信号,但是 B_z 场的视电导率在更早的时间点回到了背景场,意味着其更早的探测到了异常体下方的半空间,再次说明 B_z 能够提前感知到地下电性体。从视电导率值上看,感应电压场获取到了更大的电导率异常值,异常体反映更强烈,而 B_z 场的视电导率异常值明显更小。为更准确地分析横向分辨能力,本文以异常响应最强的 $t=0.01$ ms(即第一道)时刻各测点的视电导率连成的曲线为基础,若两个异常体分布在不同的波谷中,则代表这两个异常体能被分辨开来。该时刻的感应电压场和 B_z 场对应的视电导率随测点的变换曲线如图 21c 所示。图中标记出了与第 4、5、6 号异常体有关的曲线波峰位置。可以看出,第 4、5、6 号异常体恰好落在感应电压场视电导率曲线不同波谷位置,而仅第 5、6 号异常体落在了 B_z 场视电导率的波谷位置,且从波峰到波谷的变化幅值

明显弱于感应电压场。可见, B_z 场的横向分辨率也差于感应电压场。

三维异常体模型的对比测试表明, B_z 场被再次证明相比感应电压场能够提前感知到地下异常体,但是横向分辨率依然差于感应电压场,对异常体电导率的呈现能力亦明显弱于感应电压场。

3 讨论

假设由时域变换到频域的傅立叶基函数为 $e^{-i\omega t}$,那么在频率域,感应电压场 $V_z(\omega)$ 和 $B_z(\omega)$ 场有如下关系

$$V_z(\omega) = i\omega B_z(\omega) \quad (13)$$

式中; i 为虚数单位, ω 为角频率。从式(13)中可以看出, B_z 场相对感应电压场具有更丰富的低频成分,而高频成分则更少。由于低频成分相对高频成

分具有探测深度大,而分辨率低、体积效应更强的特征,这也就决定了 B_z 相对感应电压场在相同的时间点能够探测到更深部的信息,或者说能够提前感知到地下信息,但是分辨率却较差的特性。本文的一维和三维模型分析再次证明了这一点。尤其是针对低导异常体,更强的体积效应导致原本就比较小的异常信号很容易被围岩较强的信号所淹没,导致 B_z 的低导异常体探测能力非常差。

本文在反演对比分析中假设了感应电压场和 B_z 场具有相同的最小相对误差,但是,实际上 B_z 场可能具有更强的抗噪能力。因此,为进行更准确的探测效果分析,需要在实际测量中对数据的质量进行准确剖析,这也是下一步工作的目标之一。

4 结论

一维模型、三维模型的感应电压场和 B_z 场数据的视电阻率以及反演结果对比分析结果表明:

1) 在本文采用的仪器精度水平以及测量方式下,只有针对电导率大于 0.036 S/m 的高导异常体, B_z 场才可能获取更长的有效观测时间。

2) 相比感应电压场, B_z 场能够提前感知到地下异常体的信息,但是对电导率的呈现能力弱于感应电压场,纵向分辨率、横向分辨率均较感应电压场差。

3) 考虑到 B_z 场分辨率不足的问题,在实际测量过程中,不建议仅测量 B_z 场,在条件允许的情况下,同时测量感应电压和 B_z 场,充分利用感应电压场强异常响应和高分辨率的特征,以及 B_z 场提前感知地下异常体的特征,达到最优的探测效果。

参考文献 (References):

- [1] Ward S H, Hohmann G W. Electromagnetic theory for geophysical application [C]// SEG: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, 1987.
- [2] 崔江伟, 薛国强, 陈卫营, 等. 电性源瞬变电磁 B 场全程视电阻率计算[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2690–2697.
Cui J W, Xue G Q, Chen W Y, et al. Calculation of all-time apparent resistivity for B field due to electrical source TEM [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6): 2690–2697.
- [3] 王兴春, 张杰, 郑学萍, 等. 磁通门探头在瞬变电磁法勘探中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(6): 649–654.
Wang X C, Zhang J, Zheng X P, et al. Application of fluxgate sensor in TEM prospecting [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(6): 649–654.
- [4] Ji Y J, Du S Y, Xie L J, et al. TEM measurement in a low resistivity overburden performed by using low temperature SQUID [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 135: 243–248.
- [5] 荣亮亮, 蒋坤, 裴易峰, 等. 适用于瞬变电磁勘探的低温超导磁传感器[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2672–2677.
Rong L L, Jiang K, Pei Y F, et al. Low-Tc SQUID sensor for time domain electromagnetic prospecting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 2672–2677.
- [6] 陈晓东, 赵毅, 张杰, 等. 高温超导磁强计在瞬变电磁法中的应用研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 702–708.
Chen X D, Zhao Y, Zhang J, et al. The application of HTc SQUID magnetometer to TEM [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 702–708.
- [7] Thomson S, Fountain D, Watts T. Airborne geophysics-evolution and revolution [C]// 5th Decennial International Conference on Mineral Exploration, 2007.
- [8] Smith R, Annan P. The use of B-field measurements in an airborne time-domain system; Part I. Benefits of B-field versus dB/dt data [J]. Exploration Geophysics, 1998, 29: 24–29.
- [9] Smith R, Annan P. Using an induction coil sensor to indirectly measure the B-field response in the bandwidth of the transient electromagnetic method [J]. Geophysics, 2000, 65(5): 1489–1494.
- [10] Wolfgram P, Thomson S. The use of B-field measurements in an airborne time-domain system-Part II: examples in conductive regimes [J]. Exploration Geophysics, 1998, 29: 225–229.
- [11] 强健科, 罗延钟, 汤井田, 等. 航空瞬变电磁法的全时域视电阻率计算方法[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1657–1661.
Qiang J K, Luo Y Z, Tang J T, et al. The algorithm of all-time apparent resistivity for Airborne Transient Electromagnetic (ATEM) survey [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(5): 1657–1661.
- [12] Li Z H, Huang Q H, Xie X B, et al. A generic 1D forward modeling and inversion algorithm for TEM sounding with an arbitrary horizontal loop [J]. Pure and Applied Geophysics, 2016, 173(8): 2869–2883.
- [13] Wang T, Hohmann G W. A finite-difference, time-domain solution for 3-dimensional electromagnetic modeling [J]. Geophysics, 1993, 58(6): 2105–2114.
- [14] 邱稚鹏, 李展辉, 李墩柱, 等. 基于非正交网格的带地形三维瞬变电磁场模拟[J]. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4245–4255.
Qiu Z P, Li Z H, Li D Z, et al. Non-orthogonal-grid based three dimensional modeling of transient electromagnetic field with topography [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(12): 4245–4255.
- [15] 李展辉, 黄清华. 复频率参数完全匹配层吸收边界在瞬变电磁法正演中的应用[J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1292–1299.
Li Z H, Huang Q H. Application of complex frequency shifted perfectly matched layer absorbing boundary conditions in transient electromagnetic method modeling [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(4): 1292–1299.
- [16] 周建美, 刘文涛, 李貅, 等. 双轴各向异性介质中回线源瞬变

电磁三维拟态有限体积正演算法[J]. 地球物理学报, 2018, 61(1): 368–378.

Zhou J M, Liu W T, Li X, et al. Research on the 3D mimetic finite volume method for loop-source TEM response in biaxial anisotropic formation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(1): 368–378.

[17] 戴锐, 李展辉, 黄清华. 瞬变电磁法三维模型数据的一维反演效果研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 1121–1129.

Dai R, Li Z H, Huang Q H. Study of one-dimensional inversion effect on transient electromagnetic data of three-dimensional models [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(3): 1121–1129.

A numerical study of transient electromagnetic sounding effect using the induced voltage and the B_z field data

LI Zhan-Hui¹, YANG Miao-Xin², CAO Xue-Feng¹

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: In this study, the authors compared the loop source transient electromagnetic sounding effect between the induced voltage data and B_z data obtained by one-dimensional and three-dimensional forward modelling. The longest effective delay time of the two types of data under the current data acquisition accuracy of mainstream hardware was analyzed through a comparison of multiple models; the longitudinal and horizontal resolutions of the two types of data were analyzed through a comparison of apparent conductivity and one-dimensional inversion. The results show that, under the data acquisition accuracy presumed in this study, only when an abnormal body with a conductivity ≥ 0.036 S/m exists in the model can the effective delay time of the B_z data be longer than the induced voltage data. Compared with the induced voltage data, the B_z data can sense the underground anomaly in advance, but are worse in longitudinal and horizontal resolutions. The recovery of resistivity by B_z data is also worse than that by the induced voltage data. In the actual field measurement, it is not recommended to record only the B_z field. If conditions are allowed, the induced voltage and the B_z field could be collected simultaneously to obtain an optimized solution.

Key words: transient electromagnetic method; B field; induced voltage; apparent conductivity; one-dimensional inversion; resolution

(本文编辑:沈效群)